



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
ИМЕНИ В.Г. МОКЕРОВА» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИСВЧПЭ РАН)

*Посвящается 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ,
д.т.н., профессора Мальцева Петра Павловича*

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ СО ВСТРОЕННЫМИ АНТЕННАМИ НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ A^3B^5

Под общ. ред. д.т.н., профессора П.П. Мальцева

**ТЕХНОСФЕРА
Москва
2018**

УДК 621.382.2/.3

ББК 32.852

С40

**С40 Системы на кристалле со встроенными антеннами
на наногетероструктурах A^3B^5**

/ Под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 524 с. ISBN 978-5-94836-526-8

В сборник вошли статьи сотрудников федерального государственного автономного научного учреждения «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова» Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), опубликованные в период 2010–2017 гг. по новым направлениям исследований наногетероструктур A^3B^5 (арсенид галлия и нитрид галлия): расчет и моделирование систем на кристалле с интегрированными антеннами и усилителями для крайне высоких частот, создание фотопроводящих антенн для терагерцовых устройств.

Статьи использованы при выполнении работ по заказу Минобрнауки России в рамках: ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2013 годы и на 2014–2020 годы.

УДК 621.382.2/.3

ББК 32.852

© 2018, ФГАНУ ИСВЧПЭ РАН

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-526-8

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Глава 1. Малогабаритные встроенные антенны сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн	11
1.1. Направления развития антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом <i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.</i>	11
1.2. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом	22
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.</i>	
1.3. Обзор реализаций встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем.	30
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В.</i>	
1.4. Интегрированные антенны на наногетероструктурах арсенида галлия.	42
<i>Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Галиев Р. Р.</i>	
1.5. Обзор реализаций планарных антенн X-диапазона с двумя слоями металлизации.	45
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Бунегина С.Л., Крапухин Д.В.</i>	
1.6. Многослойные планарные антенны. Часть 1. Типы, реализации, преимущества	59
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Крапухин Д.В., Бунегина С.Л.</i>	
1.7. Многослойные планарные антенны. Часть 2. Обеспечение много-частотного режима круговой или эллиптической поляризации излучения.	74
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П., Фёдоров Ю.В., Крапухин Д.В., Бунегина С.Л.</i>	
1.8. Интегрированные антенны для использования в системах на кристалле.	83
<i>Матвеев О.С.</i>	
Глава 2. Фотопроводящие материалы и интегральные антенны на их основе для терагерцевого диапазона частот	89
2.1. МНЕМТ с предельной частотой усиления по мощности $f_c = 0,63$ ТГц на основе наногетероструктуры InAlAs/InGaAs/InAlAs/GaAs.	89
<i>Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Хабибуллин Р.А., Пономарёв Д.С., Фёдоров Ю.В., Мальцев П.П.</i>	

2.2. Исследование малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных транзисторов для монолитных интегральных схем в крайневых высокочастотном диапазоне	95
<i>Мальцев П.П., Гнатюк Д.Л., Фёдоров Ю.В., Зуев А.В., Галиев Р.Р., Побойкина Н.В.</i>	
2.3. Разработка и исследование фотопроводящих антенн на основе полупроводников группы АЗВ5, выращенных при пониженных температурах эпитаксиального роста.	100
<i>Галиев Г.Б., Климов Е.А., Лаврухин Д.В. Ячменев А.Э., Галиев Р.Р., Пономарёв Д.С., Хабибуллин Р.А., Фёдоров Ю.В., Бугаев А.С.</i>	
2.4. Разработка материалов и фотопроводящих антенн на их основе для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцевое (ТГц) излучения.	103
<i>Бугаев А.С., Глинский И.А., Пушкарёв С.С., Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С.</i>	
2.5. Терагерцевое излучение эпитаксиальных низкотемпературных GaAs-структур на подложках GaAs (100) и (111)А	111
<i>Галиев Г.Б., Буяков А.М., Билык В.Р., Хусяинов Д.И., Мишина Е.Д., Климов Е.А., Ключков А.Н., Пушкарёв С.С., Васильевский И.С., Грехов М.М., Трунькин И.Н., Васильев А.Л.</i>	
Глава 3. Системы на кристалле со встроенными антеннами	122
3.1. Перспективы создания систем на кристалле для СВЧ- и КВЧ-диапазонов частот на арсениде галлия	122
<i>Мальцев П.П.</i>	
3.2. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные.	139
<i>Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.</i>	
3.3. Технология сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN. Обзор.	149
<i>Павлов В.Ю., Павлов А.Ю.</i>	
3.4. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN НЕМТ.	158
<i>Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.</i>	
3.5. Переход от сплавной к несплавной технологии омических контактов при росте диапазона рабочих частот СВЧ МИС на основе нитрида галлия	166
<i>Павлов А.Ю.</i>	
3.6. Малошумящие усилители диапазона 60 ГГц. Обзор мировых коммерческих разработок.	174
<i>Крапухин Д.В.</i>	
3.7. Монолитная интегральная схема ГУН V-диапазона	183
<i>Мальцев П.П., Фёдоров Ю.В., Крапухин Д.В., Матвеев О.С., Путинцев Б.Г.</i>	
3.8. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн	187
<i>Мальцев П.П., Матвеев О.С., Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Зуев А.В., Бунегина С.Л.</i>	

3.9. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия	192
<i>Фёдоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеевко О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Томош К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А.</i>	
3.10. Разработка однокристалльных приемопередающих модулей V-диапазона на нитриде галлия	213
<i>Путинцев Б.Г.</i>	
3.11. СВЧ-технологии — основа электроники будущего. Тенденции и рынки	220
<i>Мальцев П.П., Шахнович И.</i>	

Приложение А. Результаты интеллектуальной деятельности ИСВЧПЭ РАН за 2010—2017 гг.	234
---	-----

Приложение Б. Усилители мощности и маломощные усилители для диапазона частот 8—12 ГГц. Обзор	238
<i>Майтама М.В., Михалёв А.О.</i>	

Б.1. Аналитический обзор современной научно-технической литературы в области усилителей мощности X-диапазона	238
Б.2. Аналитический обзор по разработке перспективных монолитных интегральных схем МИС усилителей мощности и маломощных усилителей X-диапазона частот.	241

Приложение В. Усилители в монолитном исполнении для диапазона частот 57—67 ГГц. Обзор	260
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	

В.1. Патентные исследования в области усилителей в монолитном исполнении мм-диапазона длин волн	260
В.2. Схемотехнические, конструкторские решения интегральных схем маломощных усилителей мм-диапазона длин волн	277
В.3. Реализация усилителей	287
В.4. Заключение	293

Приложение Г. Генераторы, управляемые напряжением для диапазона частот 57—67 ГГц. Обзор	296
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	

Г.1. Основная (аналитическая) часть. Генераторы, управляемые напряжением мм-диапазона длин волн	296
Г.2. Развитие схемы генератора с одиночным транзистором	297
Г.3. Развитие генераторов, управляемых напряжением, построенных по схеме двухтактного, дифференциального генераторов	303
Г.4. Примеры разработки генераторов, управляемых напряжением	306
Г.5. Заключение	307

Приложение Д. Схемотехнические и конструкторские решения для смесителей для диапазона частот 57—67 ГГц. Обзор	309
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	
Д.1. Принципы построения смесителей	309
Д.2. Схемотехника перемножителей	314
Д.3. Структуры двойных балансных смесителей на основе перемножителей	328
Д.4. Реализация фазорасщепителей.	337
Д.5. Реализация смесителей	354
Д.6. Заключение.	359
Приложение Е. Радиоприемные устройства для диапазона частот 57—67 ГГц. Обзор	363
<i>Гнатюк Д.Л., Лисицкий А.П.</i>	
Е.1. Развитие радиоприемных устройств мм-диапазона длин волн	363
Приложение Ж. Стратегическая программа исследований технологической платформы «СВЧ-технологии»	425
Ж.1. Текущие тенденции развития рынков и технологий в сфере деятельности платформы	428
Ж.2. Прогноз развития рынков и технологий в сфере деятельности платформы.	455
Ж.3. Направления исследований и разработок, наиболее перспективные для развития в рамках платформы	475
Ж.4. Тематический план работ и проектов платформы в сфере исследований и разработок.	481
Ж.5. Мероприятия по коммерциализации технологий и совершенствованию механизмов управления правами на результаты интеллектуальной деятельности	482
Ж.6. Меры в области подготовки и развития научных и инженерно-технических кадров	491
Приложение З. Справочный лист комплекта монолитных интегральных схем на нитриде галлия для диапазона 57—64 ГГц	516
Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц, терминов	522

*Посвящается 70-летию со дня рождения
Мальцева Петра Павловича*

ВВЕДЕНИЕ

В данный сборник вошли статьи сотрудников федерального государственного автономного научного учреждения «Институт сверхвысококачастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук» (ИСВЧПЭ РАН), опубликованные в период с 2010 по 2017 гг., которые освещают новые направления исследований наногетероструктур АЗВ5 (арсенид галлия и нитрид галлия):

- расчет и моделирование систем на кристалле с интегрированными антеннами и усилителями для крайне высоких частот;
- создание фотопроводящих антенн для терагерцовых устройств.

Статьи использованы при выполнении работ по заказу Минобрнауки России в рамках: ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008—2015 годы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007—2013 годы и на 2014—2020 годы.

Кратко можно отметить следующие основные моменты биографии Мальцева П.П.: родился 28 сентября 1947 г., закончил физико-математическую среднюю школу № 110 в г. Ташкенте в 1967 г., получил высшее техническое образование в Ташкентском электротехническом институте связи (1967—1971 гг.) и закончил аспирантуру Московского электротехнического института связи (1973—1977 гг.). Работал в 22-м Центральном научно-исследовательском институте Министерства обороны (1977—1989 гг.), секции прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук (1989—2007 гг.), Технологическом центре МИЭТ (2007—2009 гг.), а с 2010 г. — директор и с 2016 г. по н.в. — научный руководитель ИСВЧПЭ РАН.

В 1985—1986 гг. Мальцев П.П. с коллективом научно-исследовательского института молекулярной электроники (НИИМЭ) сформировал комплексно-целевую программу по разработке цифровых интегральных схем на арсениде галлия двойного назначения. Создание интегральных схем на арсениде галлия и их испытания стали основой докторской диссертации П.П. Мальцева (1994 г.) и присвоения звания профессора (1996 г.), а затем по данной тематике ему в составе коллектива ученых была присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 1999 г. (в 2000 г.).

Мальцев П.П. является известным специалистом в области электроники, он активно участвовал в разработке комплексно-целевых программ по созданию приборов нанoeлектроники (1995 г.) и по разработке микросистемной техники (1998 г.) двойного назначения.

Мальцев П.П. разработал в 2010 году технологическую платформу ТП 104 «Мобильные и беспроводные коммуникации в миллиметровом диапазоне длин (60—90 ГГц)» (организатор ИСВЧПЭ РАН), которая вошла в технологическую платформу «СВЧ-технологии», включенную в Перечень технологических платформ (утвержден решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям (от 01.04.2011 г. протокол №2 и от 05.07.2011 г. протокол №3) и решением президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям (от 21.02.2012 г. протокол №2) — позиция в перечне №26).

Научная жизнь Мальцева П.П. тесно переплелась с работой в качестве главного редактора журналов «Нано- и микросистемная техника» (с 1999 г. по н. в.), «Электроника: Наука. Технология. Бизнес» (2005—2011 гг.) и «Наноиндустрия» (2007—2011 гг.). Он активно внедрял научные результаты в образовательный процесс и в 1999 г. создал кафедру микросистемной техники в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), которую возглавлял до 2016 г. — до создания объединенной кафедры нанозлектроники. За время работы кафедры было подготовлено более трехсот специалистов по микросистемной технике, и бакалавров и магистров по специальности «нанотехнологии и микросистемная техника», а также около десятка кандидатов технических наук.

Мальцев П.П. внес большой вклад в подготовку специалистов высшей квалификации, работая в составе экспертного совета Высшей аттестационной комиссии России (с 1998 г. по н. в.). Он является соавтором более 250 публикаций, а также около 40 результатов интеллектуальной деятельности.

В 2014 г. П.П. Мальцев награжден знаком «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», а в 2015 г. ему присуждена премия им. А.А. Расплетина Российской академии наук за цикл публикаций по созданию СВЧ-систем на кристалле на широкозонных полупроводниках для миллиметрового диапазона длин волн.

Ранее вышел сборник статей, посвященный 70-летию члена-корреспондента РАН В.Г. Мокерова (1940—2008 гг.), в который вошли статьи сотрудников ИСВЧПЭ РАН, опубликованные в период с 1986 по 2009 годы (монография «Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике». Техносфера, М., 2010. — 432 с. Составитель: П.П. Мальцев).

Данный сборник статей посвящается 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора Мальцева Петра Павловича — директора ИСВЧПЭ РАН с 2010 по 2016 годы.

*Директор ИСВЧПЭ РАН,
д.т.н., профессор С.А. Гамрелидзе*



Фотография от 22 мая 2018 г.: установление на здании ИСВЧПЭ РАН памятной доски с барельефом члена-корреспондента Российской академии наук Мокерова Владимира Григорьевича — директора, организатора института с 2002 по 2008 годы. Слева — Мальцев Петр Павлович, д.т.н., профессор, научный руководитель ИСВЧПЭ РАН; справа — Гамкредидзе Сергей Анатольевич, д.т.н., профессор, директор ИСВЧПЭ РАН. Приказом ФАНО России от 24.01.2018 г. № 23 федеральному государственному автономному научному учреждению институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук присвоено имя В.Г. Мокерова.

**Монографии, справочники и сборники статей
под редакцией или в соавторстве с П.П. Мальцевым**

1. Цифровая обработка информации на основе быстродействия БИС / С.А. Гамкредидзе, А.В. Завьялов, П.П. Мальцев, В.Г. Соколов / Под редакцией В.Г. Домрачева. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 136 с.: илл.
2. Интегральные микросхемы: взаимозаменяемость и аналоги: Справочник / М.А. Бедревский, А.А. Косырбасов, П.П. Мальцев. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 272 с.: илл.
3. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС / В.Г. Домрачев, П.П. Мальцев, В.Г. Новаченко, С.Н. Пономарев. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.: илл.

4. Цифровые интегральные микросхемы: Справочник / П.П. Мальцев., Н.С. Долидзе, М.И. Критенко, С.Н. Понамарев, В.В. Портянко, Т.Т. Посысаева, Л.З. Михалева. — М.: Радио и связь, 1994. — 128 с.: илл.
5. Датчики теплотехнических и механических величин: Справочник / П.П. Мальцев, А.Ю. Кузин, И.А. Шапортов, И.А. Беспалов. — М.: Энергоатомиздат, 1996. — 128 с.: илл.
6. Программируемые логические ИМС на КМОП-структурах и их применение / П.П. Мальцев, Н.И. Гарбузов, А.П. Шаратов, Д.А. Кнышев. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 160 с.: илл.
7. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2005. — 592с.
8. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 г. / Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2006. — 152 с.
9. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2008 г. / Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2008. — 432 с.
10. Базовые лекции по электронике. Т. II. Твердотельная электроника, глава 13 «Микросистемная техника» / П.П. Мальцев, В.А. Телец. — М.: Техносфера, 2009. — 76 с.: илл.
11. Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона; пер. с англ. А.Е. Грахова под ред. П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2011. — 496 с. — (16 с. цв. вклейки).
12. Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем (научно-технологические проблемы и аспекты развития) / А.С. Комаров, Д.В. Крапухин, Е.И. Шульгин. Под редакцией П.П. Мальцева. — М: Техносфера, 2014. — 240 с.